タフトライド処理鋼の疲労限に及ぼす 焼もどしの影響について*

浅 見 克 敏**

On the Effect of Tempering to the Fatigue Limit of Tufftrided Steel

by

Katsutoshi ASAMI

(Musashi Institute of Technology, Tokyo)

The authors proposed previously the method for predicting the fatigue limit of smoothed specimens made of tufftrided steel from the hardened depth h and the distance from surface to center of specimen a . It was expected that the linear relation should hold between the improvement ratio of fatigue limit $\sigma_{w.t}/\sigma_{w.n.t}$ and $h/(a-h)$ according to the prediction method. In case of the tufftrided steel supersaturated with nitrogen in the matrix, the linear relation was observed between these two quantities as expected and the validity of the method was clarified.

On the other hand, it has been already reported that the fatigue limit of tufftrided steel decreases with the precipitation of nitrides of Fe_4N . In this paper, the applicability of this prediction method is investigated on the tufftrided steel which has the nitrides of Fe_4N .

The results obtained are summarized as follows:

(1) The fatigue limit of tufftrided steel decreases with the increase of nitride, and the decrease stops when the precipitation of nitride is perfectly completed. Its fatigue limit is still larger than that of non-tufftrided steel.

(2) The linear relation is also observed between $\sigma_{w.t}/\sigma_{w.n.t}$ and $h/(a-h)$ on the tufftrided steel which contains nitrides. Consequently, it is concluded that the prediction method proposed by the authors can be applied regardless of the condition of nitrogen. However, the linear relation equations differ depending upon the condition of nitrogen.

(Received June 13, 1975)

1 緒 言

タフトライド処理により鉄鋼材料の疲労強度が著しく向上することはよく知られ、機械部品などに多く用いられつつある。機械部品を設計する際、強度の基準となるものに疲労限がある。一般の鉄鋼材料の疲労限¹⁾に関してはすでに多くの資料があり、新たに面倒な疲労試験を行なって疲労限を求めずにすむ場合が多い。しかし、タフトライド処理鋼のような表面硬化材では同一材料でも処理条件²⁾（処理時間³⁾、冷却方法⁴⁾、焼もどし⁵⁾⁻⁷⁾など）や寸法によりその疲労限が著しく異なり、設計者にとって面倒な問題となっている。また、この問題はタフトライド処理をより有効に用いるためにも重

要な課題といえる。

そこで著者らはタフトライド処理鋼の疲労強度向上の機構に関する研究結果に基づき、タフトライド処理鋼平滑材の疲労限を硬化深さ（処理時間）から推定する式を提案した。そして、その適用性や適用上の限界などについて実験より検討し、実際の設計面でかなり有効と思われる推定式⁸⁾およびタフトライド処理の有効限界³⁾が求められた。しかしながら、この結果は低炭素鋼を 570℃の塩浴処理後水冷した場合のものである。従来の研究⁴⁾⁶⁾⁻⁸⁾によるとタフトライド処理はこのような場合に耐疲労性の面では最も効果があるといわれている。その理由は、塩浴処理時に α 鉄に浸入した窒素がその後の水冷によって常温においても過飽和な状態で固溶され、この固溶窒素が疲労によるすべりを著しく阻止¹⁰⁾¹¹⁾し、かつそのために主として水冷によって表面近傍に発生した圧縮残留応力が疲労過程中ほとんど減少しな

* 本報を「タフトライド処理鋼の疲労限推定に関する一検討（第2報）」(Study on the Prediction of Fatigue Limit of Tufftrided Steel, II) とする。

原稿受理 昭和50年6月13日

** 正 会 員 武蔵工業大学 東京都世田谷区玉堤

いたためなどによる。しかし、過飽和に固溶されている窒素は不安定であり、温度と時間によっては析出して疲労強度に影響すると考えられる。この点に関する研究は今井ら⁵⁾、喜多ら⁶⁾、著者らおよび中村ら⁷⁾によって行なわれている。その詳細は文献にゆずるが、窒素が γ' 相(Fe_4N)として析出するとすべり変形の阻止能力が低下し、圧縮残留応力も減少するために疲労強度が低下すると考えられている。

したがって、タフトライド処理鋼の疲労強度は窒素の状態によってかなり異なることになる。使用条件によっては固溶されていた窒素が析出する場合も予想され、当初予定していた疲労強度より低下することも設計者としては考慮すべきときがある。この点に関しては現在のところ設計に役立ちうるような疲労限の面からの検討はほとんど行なわれていない。そこで本研究では処理時間と寸法を種々変えたタフトライド処理鋼平滑材を焼もどしすることによって固溶している窒素を強制的に析出せしめ、疲労限に及ぼす窒素析出の影響を調べた。そして、硬化深さより疲労限を推定する著者らの考え方がこの場合にも適用できるかどうかを検討した。その結果、タフトライド処理鋼の疲労限推定に関し実用上有益と思われる知見が得られたので報告する。

2 材料および実験方法

実験に供した材料は化学組成を Table I に示す低炭素鋼で、前報の水冷により窒素が過飽和に固溶していた場合と同一である。試片はその形状寸法を Fig. 1 に示す平滑丸棒材で、今回の実験には 6, 10, 14 および 18φ の 4 種類を用いた。このように機械加工後、900℃、40 分の真空焼なましを施したのちタフトライド処理を行なった。タフトライド処理条件は塩浴の温度を 570℃、処理時間を 90 分とした。なお、10φ 試片についてはこのほかに 1, 10, 180 および 360 分を加えた。塩浴処理後の冷却はすべて水冷とし、このような

Table I. Chemical compositions of specimen (%).

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.19	0.43	0.018	0.023

d ^φ	L	l'	l	D ^φ
6	60	20	20	8
10	210	75	60	15
12	210	75	60	15
14	255	95	65	22
18	255	95	65	22

Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

タフトライド処理によって窒素は α 鉄中に過飽和に固溶される。この過飽和固溶された窒素を析出させるためにその後焼もどしを行なった。焼もどし温度としては従来の研究より最も析出しやすいといわれている 300℃を採用した。焼もどし時間によっては試片の質量効果のため各試片で析出状態が異なることが予想される。そこで予備実験として各径の試片を 300℃で 5, 15, 30, 60, 90 および 120 分保持後、空冷してみた。その結果、60 分までは析出物の発生状態とかたさ分布に試片の径によってかなりの差がみられた。しかし、60 分以上になると試片の径に関係なくそれらは同じとなり、過飽和固溶されていた窒素は完全に析出し、組織的にも安定していると考えられる。そこで本実験では焼もどし時間を 90 分、冷却は空冷とした。10φ 試片については析出状態の相違による疲労強度への影響をも調べるため 300℃、15 分保持後空冷の焼もどしを追加した。以後、タフトライド処理していない試片を無処理材、タフトライド処理のみの試片をタフトライド処理材、タフトライド処理後に焼もどした試片を 15 分および 90 分焼もどし材と称する。

疲労試験は容量の異なる 3 種類の小野式回転曲げ疲労試験機で行なったが、その容量は 6φ 試片で 1.5 kg·m、10φ 試片で 10 kg·m、14φ および 18φ 試片で 30 kg·m である。各試片の疲労前後における断面かたさ分布は微小硬度計(荷重 100 g)で、表面残留応力(化合物層直下)は X 線応力測定法で求めた。なお、ここでいう疲労後とは疲労限応力を 10⁷ 回負荷後を意味する。

なお、本報における無処理材およびタフトライド処理材の結果は前報で得られたものである。

3 実験結果

3.1 かたさ分布

疲労前の断面かたさ分布の例としてタフトライド処理時間が 10 分と 180 分の場合を Figs. 2 と 3 に示す。焼もどしすると表面近くのかたさは低下し、従来の結果と同じである。特に 90 分焼もどし材でその傾向は著

Fig. 2. Distribution of hardness on specimen tufftrided for 10 min.

Fig. 3. Distribution of hardness on specimen tufftrided for 180 min.

しく、焼もどし時間、いいかえるならば窒素の析出状態の差によって低下の程度が異なることがわかる。一方、試片内部では 300℃の焼もどしによる窒素拡散のため、かたさはタフトライド処理材よりも若干高くなり、硬化深さが大になる場合もある。

焼もどし時間別にかたさ分布をまとめて示したのが Figs. 4 と 5 である。90 分以上塩浴処理されたタフトライド処理材を90分焼もどしするとそれらの表面近くのかたさ値に差はほとんど認められない。したがって、この場合表面近くの析出状態はほぼ同じと考えられ、光学顕微鏡で観察したかぎり差はみられなかった。この両図より硬化深さ（母材のかたさと一致するところまでの深さ）を求め、Table II にまとめて示す。試

Fig. 4. Distribution of hardness on specimen tempered for 15 min.

Fig. 5. Distribution of hardness on specimen tempered for 90 min.

Table II. Hardened depth of each specimen.

Tufftriding time Tem- pering time	(mm)				
	1 min	10 min	90 min	180 min	360 min
15 min	0.1	0.6	1.15	1.3	1.6
90 min	0	0.3	1.2	1.4	1.7

片の径による硬化深さに差はみられなかった。

なお、15分および90分焼もどし材の断面組織を光学顕微鏡で観察した結果、15分焼もどし材では化合物層直下に若干の析出物 (γ' -Fe₄N) がみられるのみで、過飽和固溶されている窒素の析出は完全には終了していなかった。一方、90分焼もどし材ではより多くの析出物 (γ' -Fe₄N) が、より内部までみられ、またタフトライド処理時間が長いものほど析出物の存在範囲は内部に及んでいた。前述の予備実験の結果からも90分焼もどし材では過飽和固溶窒素は析出し、 γ' -Fe₄N になっていると考えられる。これら観察結果の写真はすでに報告されているものと同様のため本報では割愛した。⁵⁾⁻⁸⁾

3・2 疲労試験

10φ試片を15分および90分焼もどした場合の S-N 曲線を、タフトライド処理時間をパラメータとして示したのが Figs. 6 と 7 である。また、タフトライド処理時間90分の試片を90分焼もどした場合の S-N 曲線を、試片の径をパラメータとして示したのが Fig. 8 である。各 S-N 曲線より焼もどし材の疲労限を求めた結果を Tables III と IV に示す。

10φ試片の疲労限を縦軸に、タフトライド処理時間を横軸にとって整理すると Fig. 9 のようになる。同図中には比較のため前報で得られているタフトライド処理材と無処理材の結果も付記した。焼もどしされると疲労限は低下し、この結果は前述の表面近くのかたさの結果とよく対応している。そして、過飽和固溶し

Fig. 6. S-N curve of specimen tempered for 15 min.

Fig. 7. S-N curve of specimen tempered for 90 min.

Fig. 8. S-N curve of 90 min tufftrided and 90 min tempered specimen.

Table III. Fatigue limit of specimen with 10 mm diameter.

		(kg/mm²)				
Tempering time	Tufftriding time	1 min	10 min	90 min	180 min	360 min
		23.4	27.8	33.6	36.2	41.8
15 min		19.4	22.9	29.3	30.1	30.6
90 min						

Table IV. Fatigue limit of specimen tufftrided for 90 min.

		(kg/mm²)			
Tempering time	Tufftriding time	6φ	10φ	14φ	18φ
		30.1	29.3	28.8	28.2
90 min					

ている窒素が完全に析出していると考えられる90分焼もどし材はタフトライド処理鋼における最低の疲労限を示しているといえよう。

つぎに、90分のタフトライド処理後、90分焼もどした場合の疲労限を縦軸に、試片の径を横軸にとって整理したのが Fig. 10 である。やはり比較のためタフトライド処理材と無処理材の結果を付記した。焼もどしによる疲労限の低下は径の小さいものほど顕著で、実用面ではこの点の注意が必要である。しかし、焼もどしされても無処理材に比べるとかなり高い疲労限を有している。また、タフトライド処理材では著しい寸

Fig. 9. Relation between fatigue limit and tufftriding time.

Fig. 10. Relation between fatigue limit and diameter of specimen.

法効果が認められるが、90分焼もどし材ではわずかで

3.3 残留応力

10φ試片における15分および90分焼もどし材の疲労前の表面残留応力を Tables V と VI に示す。15分焼もどし材では従来報告されているタフトライド処理材と同程度の圧縮残留応力が残存しており、かたさの低下が少ないことと対応している。一方、90分焼もどし材になると残留応力はほとんど消滅している。したがって、90分焼もどし材では窒素の析出によりすべりの阻止能力が減少して疲労限が低下することのほかに、表面近くの圧縮残留応力が消滅したことによる疲労限の低下もかなりあると考えられる。この点に関する詳細な検討はすでに平板材において行なっているので文献を参照されたい。

4 検 討

窒素が過飽和固溶されているタフトライド処理鋼平滑材に適用できた著者らの疲労限推定の考え方^{3,9)}が、窒素を強制的に析出させた本実験の焼もどした低炭素鋼平滑材にも適用可能かどうかを以下で検討する。

著者らは繰返し応力による試片内部の硬化と残留応力を考慮した結果、タフトライド処理鋼平滑材では

Table V. Surface residual stress of specimen tempered for 15 min.

Tufftriding time (min)	Surface residual stress (kg/mm ²)	
	Before fatigue	After fatigue
1	-32.2	-17.9
10	-37.8	-16.8
90	-35.7	-20.8
180	-36.2	-19.7
360	-37.8	-21.2

Table VI. Surface residual stress of specimen tempered for 90 min.

Tufftriding time (min)	Surface residual stress (kg/mm ²)	
	Before fatigue	After fatigue
1	-2.8	-1.9
10	-4.8	-1.9
90	-5.6	-3.8
180	-7.6	-2.9
360	-5.6	-4.2

$\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(r-h)$ は直線関係にあると予想した。ここで、 $\sigma_{w,t}$ はタフトライド処理鋼の疲労限、 $\sigma_{w,nt}$ は無処理材の疲労限、 h は硬化深さ、 r は試片の半径である。そして、多くの実験より窒素が過飽和固溶され、かつ圧縮残留応力が存在する低炭素鋼の回転曲げ疲労においては Fig. 11 に示す直線関係を得た³⁾。したがって、この場合には h 、 r および $\sigma_{w,nt}$ が決まるとこの図より $\sigma_{w,t}$ が推定できることになる。同様に本実験より得られた焼もどし材の硬化深さ (Table II 参照) と疲労限 (Tables III と IV 参照) の結果に基づき焼もどし材における $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(r-h)$ の関係を求めたのが Fig. 11 である。やはり両者の間には単純な直線関係が認められ、窒素が析出している場合にも著者らの疲労限推定の考え方が適用できることがわかる。Fig. 11 の窒素が完全に析出し、圧縮残留応力

Fig. 11. Relation between $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ and $h/(r-h)$.

がない90分焼もどし材の結果はタフトライド処理鋼の最低の疲労限を示し、参考のため破線で表わしたタフトライド処理材の結果は最高の疲労限を示すことになる。そして、15分焼もどし材の結果から明らかなように窒素の析出が不十分な場合にはこの間に入る。以上、Fig. 11 に示された $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(r-h)$ の直線関係を用いれば窒素の状態がどのような場合にも硬化深さから疲労限を推定することが可能となり、設計面でもかなり役立つものと考えられる。

なお、窒素が過飽和固溶され、圧縮残留応力も存在するタフトライド処理材では $h/(r-h) \leq 0.6$ までは疲労限の向上がみられる。しかし、 $h/(r-h) \geq 0.6$ になると疲労限向上率は約 2.8 で一定となる。一方、窒素が完全に析出してしまい、圧縮残留応力もない90分焼もどし材では $h/(r-h) \geq 0.15$ で向上は止まり、その向上率も約 1.6 とわずかである。このようにタフトライド処理による疲労限向上には限界があり、この有効限界は窒素の状態により異なる。したがって、今後タフトライド処理を耐疲労性の面で採用する際にはこの有効限界を考慮した設計が望まれる。

タフトライド処理による疲労限の向上には前報⁹⁾で明らかにしたように繰返し応力による硬化と圧縮残留応力が寄与している。この点を特に明確に表わしているのは疲労限向上率が一定になるまでの $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(r-h)$ の関係式である。すなわち、ほぼ以下の式で表わされ、

$$\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt} = C_1 \{h/(r-h)\} + 1 + C_2 \quad (1)$$

この式における定数 C_1 が繰返し応力による硬化による疲労限向上の程度を、 C_2 が残留応力による疲労限向上の程度を示しているからである。そこでこの定数に対する焼もどし材の結果を調べ、窒素の状態などが繰返し応力による硬化と残留応力にどの程度影響しているかを以下で若干検討する。

まず、繰返し応力による硬化であるが、疲労前後のかたさ分布の例を Figs. 12 と 13 に示す。この両図は90分タフトライド処理した10φ試片を15分および90分焼もどした場合である。タフトライド処理材と同様、繰返し応力により試片内部が硬化しているのがわかる。この硬化による疲労限向上の程度を示す定数 C_1 はタフトライド処理材では2.35、15分焼もどし材では2.24、90分焼もどし材では3.04と窒素の状態によらず1以上になる。したがって窒素の状態によらず繰返し応力による試片内部の硬化が疲労限向上に寄与していることが明らかである。しかし、 C_1 の値は各材で若干異なり、繰返し応力による硬化の疲労限向上に対する寄与には窒素の状態など材質的なものが微妙に影響してい

*1 繰返し応力による硬化がない、あるいは非常に少ない場合は定数 C_1 は1になる。

Fig. 12. Distribution of hardness before fatigue and after fatigue on specimen tempered for 15 min.

Fig. 13. Distribution of hardness before fatigue and after fatigue on specimen tempered for 90 min.

と考えられる。これは窒素の状態により繰返し応力による硬化の程度に差が生じるためと思われるが、今後の検討課題である。

つぎに、残留応力の寄与であるが、残留応力による疲労限向上率を示す定数 C_2 はタフトライド処理材で 0.38, 15分焼もどし材で 0.22, 90分焼もどし材ではほぼ 0 である。したがって、疲労限向上に対する残留応力の寄与はタフトライド処理材が最も大きく、90分焼もどし材では寄与していないことになる。そして、15分焼もどし材はこれらの中間である。しかし、15分焼もどし材の疲労前の表面残留応力は Table V に示したようにタフトライド処理材と同程度の -35 kg/mm^2 前後である。この点から考えると C_2 の値もタフトライド処理材と大差ないはずであるが、実際には約半分であり、残留応力による疲労限向上はタフトライド処理材に比べて15分焼もどし材のほうが少ない。そこで疲労後の表面残留応力を測定した結果が Table V である。疲労後には残留応力は $-17 \sim -21 \text{ kg/mm}^2$ となり、タフトライド処理材ではほとんど減少しないのに比べて疲労前の半分程度に減少している。このためにタフトライド処理材と15分焼もどし材では疲労前の残留応力に差がなくとも C_2 の値に差が生じたと考えられ、疲労後の残留応力値からみると15分焼もどし材

の C_2 の値はほぼ妥当なものといえる。一方、90分焼もどし材の疲労前後の表面残留応力は Table VI に示したようにほぼ 0 であり、 C_2 の値が 0 であったことと対応している。このように残留応力の疲労限向上への寄与は明らかであるが、窒素が若干なりと析出している状態では疲労による残留応力の減少があるので残留応力の評価には注意が必要である。

以上、窒素の状態によらず繰返し応力によって試片内部は硬化し、疲労限の向上に寄与している。しかし、残留応力は窒素の状態によって著しく影響を受け、疲労限向上に対する寄与の程度が異なる。なお、試片の表面近く（化合物層直下の拡散層）のかたさは繰返し応力によりあまり上昇しない。そして、90分焼もどし材においてタフトライド処理時間が90分以上になると表面近くのかたさはほぼ同じ値（約 $H_v 200$ ）を示し、表面近くの強度は大差ないと考えられる。このような場合の $h/(r-h)$ はすべて 0.15 以上であり、疲労限向上率が一定になるところと一致している。したがって、このような場合には表面近くが疲労破壊の起点となり、表面近くの強度が同程度のために疲労限向上率が一定となったものといえる。同様の現象はすでに Fig. 11 に示したタフトライド処理材にもみられる³⁾。しかし、疲労限向上率および向上率が一定になるところの $h/(r-h)$ は90分焼もどし材で著しく小さい。この理由は、⁹⁾表面近くのかたさがタフトライド処理材の約 $H_v 300$ に比べて $H_v 100$ 程度低い、すなわち強度的に弱いために表面近くで疲労破壊が起こりやすくなるためである。

5 結 論

窒素を過飽和しているタフトライド処理した低炭素鋼を焼もどしすることによって窒素を強制的に析出せしめ、疲労限に対する影響を調べた。そして、従来著者らがタフトライド処理鋼平滑材に関して提案している硬化深さから疲労限を推定する考え方がこの場合にも適用可能かどうかを検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 焼もどしにより過飽和固溶している窒素を強制的に析出せしめると、疲労限は低下する。これは窒素析出による表面近くの材質的な強度低下のほかに圧縮残留応力の消滅あるいは疲労による減少にも影響される。

(2) 窒素の析出状態により疲労限の低下の程度は異なり、 $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ として完全に析出しきったときに最低になる。しかし、その場合でも無処理材よりはかなり高い疲労限を有する。

(3) 繰返し応力による試片内部の硬化は窒素の状態にかかわらず認められ、タフトライド処理による疲労限向上にこの硬化は寄与していると考えられる。

(4) $\sigma_{w,t}/\sigma_{w,nt}$ と $h/(r-h)$ の間には窒素が過飽和固溶している場合と同様な単純な直線関係が認められ、著者らの提案した疲労限推定の考え方は窒素の状態によらず適用できる。

(5) タフトライド処理による疲労限の向上は $h/(r-h)$ がある程度以上大きくなると一定となり、疲労限向上には h と r の組合せにより有効限界が存在する。この有効限界およびその場合の疲労限向上率は窒素の状態により異なる。窒素を過飽和固溶し、圧縮残留応力が存在する、すなわち疲労強度の面では最高の場合の有効限界は $h/(r-h) \doteq 0.6$ 、向上率は約 2.8 である。そして、窒素が完全に析出し、残留応力も存在しない、すなわち最低の場合の有効限界は $h/(r-h) \doteq 0.15$ 、向上率は約 1.6 である。

なお、本実験の結果は低炭素鋼平滑材に関するもので、鋼種が異なったり切欠きを有する場合にもこの結果あるいは提案している疲労限推定の考え方が適用できるかどうかは今後の重要課題といえる。現在この点に関する実験を行なっているので後日報告したいと考えている。

本研究遂行にあたり実験を協力された武蔵工業大学

学生(当時)石川忠明、加美山正明、伊藤 久、今井良夫の四君に謝意を表する。また、タフトライド処理をご担当いただいた日本パーカーライジング会社ならびに鋼材をご提供くださった日本鋼管会社の関係者各位に感謝する。

(昭和49年5月22日 日本材料学会第23期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 日本パーカーライジング株式会社技術資料。
- 2) たとえば、日本機械学会，金属材料疲れ強さの設計資料。
- 3) 浅見克敏，寺沢正男，材料，**23**，564 (1974)。
- 4) 喜多 清ら，金属学会誌，**38**，852 (1974)。
- 5) 今井勇之進，香川博幸，金属学会誌，**30**，290 (1966)。
- 6) 喜多 清ら，金属学会誌，**37**，26 (1973)。
- 7) Terasawa, M., Y. Yoshioka, and K. Asami, 15th Proc. Japan Cong. Mat. Res., p.80 (1972)。
- 8) 中村 宏ら，機械学会論文集，**41**，351 (1975)。
- 9) 浅見克敏，吉岡靖夫，寺沢正男，材料，**22**，359 (1973)。
- 10) 寺沢正男，吉岡靖夫，浅見克敏，材料，**17**，1114 (1968)。
- 11) Müller, Y., 熱処理，**11**，146 (1971)。
- 12) 寺沢正男，吉岡靖夫，浅見克敏，材料，**16**，991 (1967)。